

Radiactividad Ambiental: Utilización de Trazadores en Sedimentos Costeros

R. A. Ligeró

Departamento de Física Aplicada
Universidad de Cádiz, 11510 Puerto Real (Cádiz)

Introducción

Como es bien conocido, la radiactividad está presente en la mayoría de las sustancias naturales, pues un considerable número de los elementos químicos que la constituyen poseen isótopos radiactivos que, en diversas proporciones, forman parte de las mismas.

Los elementos radiactivos tienen diversos orígenes. Hay elementos que han estado presentes en la corteza terrestre desde el origen del planeta (*geogénicos*), otros se están formando continuamente en la atmósfera por interacción de la misma con la radiación cósmica (*cosmogénicos*), y otros han sido reintroducidos por el hombre o alterada su distribución natural a consecuencia de actividades industriales, energéticas o militares (*antropogénicos*). Entre los primeros destacan los radionúclidos provenientes de las cuatro series radiactivas, ^{232}Th , ^{237}Np , ^{238}U y ^{235}U , y algunos radioisótopos aislados, de los que destacamos el ^{40}K y el ^{87}Rb . A señalar que los elementos la serie del neptunio, que poseen semividas sensiblemente inferiores a la edad de la Tierra, se extinguieron hace tiempo, y muchos de ellos han sido reintroducidos por el hombre en la Naturaleza como consecuencia de las pruebas nucleares atmosféricas efectuadas a partir de 1945, y en particular en los años 1961 a 1963. Entre los radionúclidos cosmogénicos destacan el ^3H y el ^{14}C , tanto por su abundancia relativa como por el hecho de que se integran en los ciclos biológicos más importantes, el del agua y el del carbono. Al último grupo pertenecen, además de los que corresponden a la mencionada serie del neptunio, el ^{137}Cs y el ^{99}Sr . El primero de ellos forma parte de la denominada *lluvia radiactiva* o “fallout” que, a partir de las detonaciones termonucleares, se generalizó a la práctica totalidad del planeta, y el segundo es el radioelemento más estudiado a escala mundial, de forma que su dispersión se utiliza como patrón de comportamiento de los radionúclidos que forman el poso radiactivo generalizado.

De conformidad con lo anterior, siendo los radionúclidos fácilmente detectables y pudiendo medir sus concentraciones con notable precisión, estos elementos pueden ser contemplados como excepcionales trazadores para el estudio de los procesos de erosión, transporte y sedimentación que tienen lugar en los distintos compartimentos ambientales.

Por otra parte, teniendo en cuenta que la desintegración radiactiva de cada radionúclido tiene lugar con un ritmo constante y característico del mismo, los trazadores radiactivos constituyen una herramienta de primer orden para establecer conclusiones cronológicas acerca de las sustancias que los contienen. Son bien conocidas las técnicas del K/Ar o del Rb/Sr empleadas para datar rocas terrestres, lunares y meteoritos, la del ^{14}C para datar objetos con base orgánica, la del ^{210}Pb para eventos históricos del orden de los 135 años o la del ^{137}Cs , susceptible de alcanzar los últimos sesenta años de antigüedad.

Un compartimento ambiental costero tipo

La erosión de las rocas terrestres, el depósito desde la atmósfera, el arrastre por agua de lluvia y su transporte por cauces fluviales, corrientes subterráneas, y cualquier otro medio, provocan un aporte masivo de materiales hacia los márgenes continentales, formando en sus costas importantes depósitos sedimentarios. De esta forma, los ambientes costeros son reservorios finales de materiales y productos procedentes de zonas continentales, a consecuencia tanto de procesos naturales como de actividades antrópicas de tipo industrial, agrícola o urbano. Si la sedimentación es continua y ordenada, los sucesivos estratos serán un buen testigo cronológico del origen y de los procesos que han contribuido a la misma. Si, por el contrario, estos depósitos de ven alterados por efecto de la erosión marina debida a corrientes, mareas o a la propia acción humana, esa misma alteración puede servir de base para estudiar los agentes causantes de la misma. En cualquier caso, la presencia asegurada de elementos radiactivos, aunque en pequeñas concentraciones, puede proporcionar una interesante herramienta de estudio por dos razones fundamentales: su fácil y precisa detección y la constancia de su desintegración radiactiva, que equivale a incluir una escala de tiempo en los sedimentos.

A lo largo de todas las costas del planeta se repite un compartimento ambiental que, si no es el más frecuente, es el que posee mayor interés medioambiental, social y económico: una zona a relativo abrigo del océano, capaz de acoger un determinado tráfico portuario, a veces también turístico y deportivo, con asentamientos urbanos que soportan una cierta actividad industrial, comercial y pesquera, y con algún río o escorrentía que aporte materiales desde zonas agrícolas o mineras (figura 1).

Es a partir del siglo XVIII cuando aumenta de forma considerable la posibilidad de transformar el medio natural, siendo el siglo XX donde más cambios morfológicos y funcionales se han producido en marcos como el descrito. En ese periodo las ciudades se han desbordado, las infraestructuras multiplicaron el espacio utilizado, se ha intensificado la acuicultura, se han puesto en peligro recursos pesqueros y la capacidad industrial ha aumentado espectacularmente.



Figura 1.- Elementos de un compartimento ambiental costero

Resulta obvio que la bahía de Cádiz es representante privilegiada de un marco como el descrito, donde se dan, por añadidura, un parque natural de extraordinario valor ecológico, una zona de marismas dominada por caños intermareales que proporcionan otra comunicación de la bahía con el Atlántico, dos partes bien diferenciadas de la bahía marítima, con distintas características oceanográficas y sedimentológicas, e incluso alguna contundente actuación humana, como la construcción del puente sobre la bahía. Los estudios y técnicas que citaremos han sido aplicados en ella, pero sus conclusiones cualitativas pueden ser generalizadas a multitud de lugares del planeta, y las cuantitativas quizá precisen tan sólo de un ajuste de los parámetros y constantes determinadas en base a una calibración radiológica de la zona en cuestión. En lo que sigue nos referiremos exclusivamente a radionúclidos emisores gamma.

Red de estaciones de control

Una vez que los materiales arrastrados alcanzan la franja costera pasan a la lámina de agua y, disueltos o en suspensión, quedan sometidos al transporte derivado de las corrientes dominantes, del oleaje o de los flujos de marea, de forma que, tras un cierto tiempo de residencia en la misma, se depositan finalmente en el lecho marino. Formando parte de estos sedimentos se incorporan también elementos radiactivos, cuya dispersión por la región será similar a la experimentada por otras sustancias de análogo comportamiento físico-químico. De esta forma, la distribución de los radionúclidos es representativa de la de muchos otros contaminantes, con la ventaja de que la primera podría realizarse mediante detectores gamma de alta

eficiencia (por ejemplo de INa), que permiten obtener mapas radiológicos en tiempo real.

El estudio que sigue se ha realizado mediante un espectrómetro nuclear gamma de Ge hiperpuro, que posee mayor precisión pero más baja eficiencia, por lo que las concentraciones de actividad se han medido en un conjunto discreto de estaciones de muestreo en los sedimentos, y el levantamiento de los correspondientes mapas se ha efectuado mediante un programa informático de interpolación a la totalidad de la región.

El isótopo radiactivo más abundante en la bahía es el ^{40}K , por lo que su distribución puede representar con mayor fidelidad la de los contaminantes que existan en la misma. En la figura 2 se representa el mapa de isólinas correspondiente, y en él podemos distinguir los puntos de máxima acumulación, que definen la red óptima de estaciones donde han de ser tomadas las muestras sedimentarias para controlar la contaminación en la región. Los datos obtenidos permiten, igualmente, la representación de la topografía tridimensional de la mencionada distribución, lo que puede mostrar con mayor claridad las mencionadas estaciones de control (figura 3).

Asimismo, y considerando que el potasio es también representativo de la salinidad en el agua de mar, puede obtenerse una representación de la misma, como la que se muestra en la figura 4. En ella podemos apreciar que en la desembocadura del río Guadalete la salinidad es mayor que en la bahía exterior. Esta aparente contradicción se explica porque, en su último tramo, el río discurre por La Tapa y Marivete, dos de las mayores salinas del país.

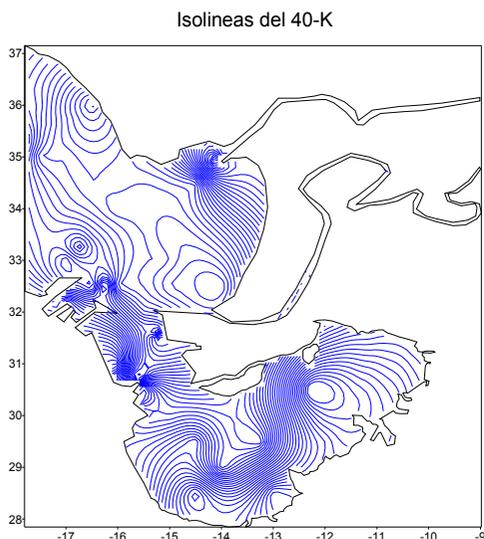


Figura 2.- Mapa de isólinas para el ^{40}K en la Bahía de Cádiz

Relación entre actividades y facies granulométrica.

En los procesos de formación de minerales, los radionúclidos se incorporan como elementos traza en las redes cristalinas. Las concentraciones de estos elementos traza dependerán del coeficiente de reparto del elemento en la fase mineral mineral. Por tanto, las concentraciones de actividad son específicas del mineral y del lugar de origen. Además existen radionúclidos que se incorporan a los sedimentos transportados por el medio acuoso, o procedentes de actividades antropogénicas.

Estudios previos demuestran que:

- La concentración de radionúclidos aumenta cuando el tamaño de grano decrece.
- Las mayores actividades se dan en materiales con alta densidad y pequeño tamaño de grano.
- Las concentraciones de radionúclidos dependen de la composición. (U y Th suelen asociarse con minerales pesados, y el K suele estar incluido en las redes de feldespatos, micas y arcillas).

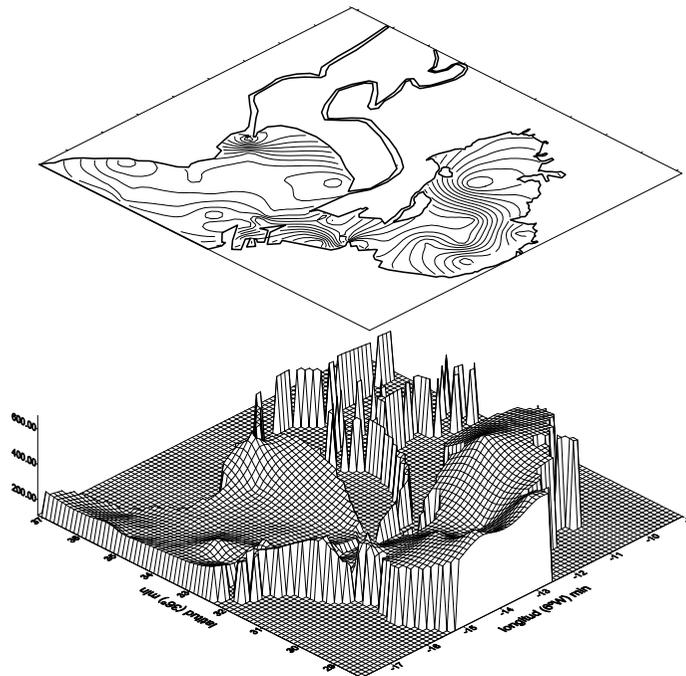


Figura 3.- Topografía para el ^{40}K en la Bahía de Cádiz

El nivel total de radiactividad puede ser utilizado para estudiar procesos de transporte y erosión. En ambientes someros, diferentes factores determinados por procesos de erosión, transporte y sedimentación, originan diferencias notables en la granulometría del sedimento. Estas diferencias en las características físicas de la matriz mineral afectan la composición química del mineral, fundamentalmente en lo que se refiere a la incorporación de materia orgánica, metales pesados y también radioisótopos. De hecho se han iniciado estudios en Holanda y Alemania, donde se usa la radiometría como una técnica de investigación costera, y se ha observado que la radiactividad en las arenas está vinculada a la fracción pesada, con lo que se han

medido cambios en el perfil de playas y de la actividad gamma a lo largo del tiempo, observándose que donde domina la erosión eólica aumenta la actividad, indicando la desaparición de minerales ligeros, en tanto que en lugares donde la erosión es causada por las mareas se observa la tendencia opuesta.

Si queremos emplear técnicas nucleares para obtener no sólo una idea cualitativa, sino también cuantitativa, es necesario estudiar la relación entre las actividades y las variables sedimentológicas que pueden explicar la fijación de radioisótopos al sedimento. Una de las correlaciones más interesantes consiste en estudiar la que pudiera existir entre el tamaño de grano y la actividad específica.

Para realizar este estudio hemos utilizado Análisis Multivariante en un espacio de seis dimensiones, cuyas coordenadas son las actividades medidas para ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K y ^{137}Cs , la densidad aparente y el contenido en carbono orgánico.

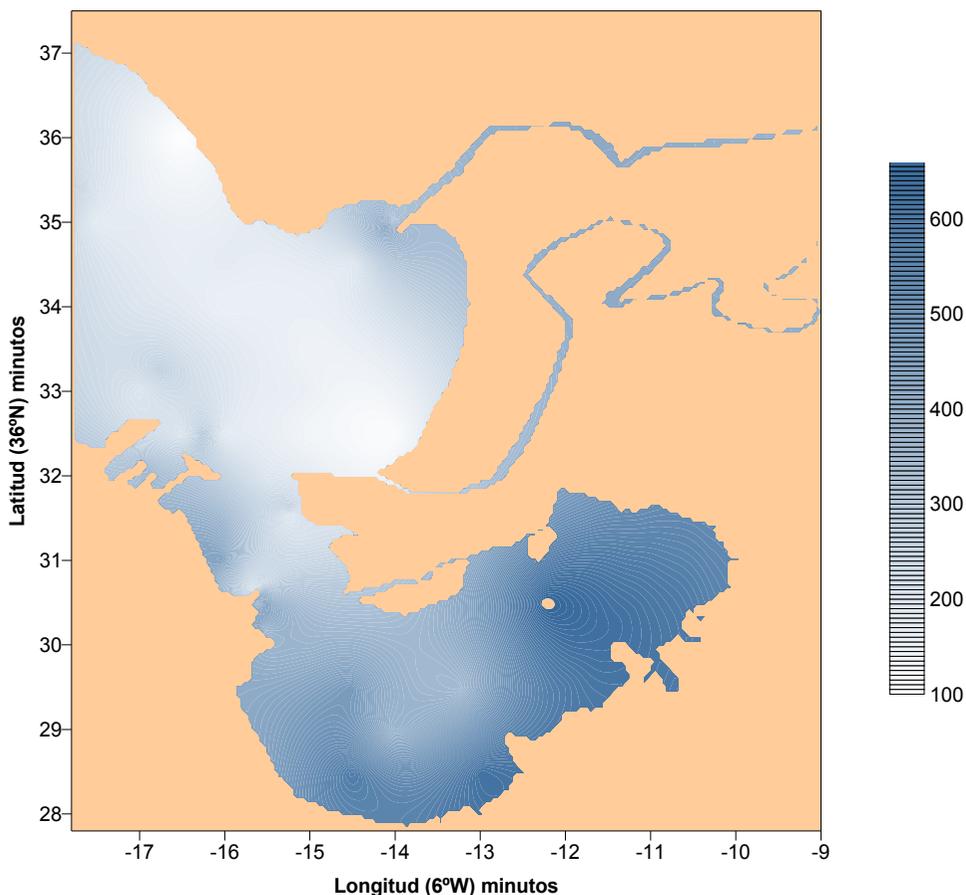


Figura 4.- Salinidad en la Bahía de Cádiz

En primer lugar se aplicó un *análisis de "clusters"*, que permite agrupar observaciones de un conjunto de datos en grupos de "puntos similares". El objetivo de este análisis es conocer la distribución de las estaciones de muestreo asociadas a cada uno de los grupos resultantes. En nuestro caso todas las estaciones quedaron integradas en dos grupos, cuyo estudio apuntó la posibilidad de que el criterio discriminador fuera la granulometría de las distintas estaciones. Para comprobar la implicación del parámetro granulometría en la clasificación, efectuamos otro tipo de análisis multivariante, el denominado ANOVA (*Analysis of Variance*), que es una técnica estadística que permite explorar las relaciones entre variables cualitativas (no métricas) denominadas *factores*, y variables cuantitativas (métricas). Así, se introducen cuatro factores, con tamaño de grano decreciente:

A (arena) AF(arena fangosa) FA (fango arenoso) F (fango)

Del resultado de este análisis es posible concluir:

1. Sólo existen diferencias significativas entre las actividades de radio y torio para los grupos arena y fango.
2. Las concentraciones de cesio, potasio y contenido en carbono orgánico en fango son distintas a las mismas para los otros grupos.
3. La densidad aparente muestra diferencias significativas para cada uno de los grupos, por lo que, como era de esperar, se trata de un parámetro que caracteriza muy bien el tipo de sedimento desde el punto de vista granulométrico.

A fin de ver el grado de correlación que existe entre las distintas variables, así como los *factores* cualitativos que las clasifican se aplica un *análisis de correlación*, y un *análisis factorial*.

De la matriz de correlación que proporciona el primero se deducen los siguientes resultados:

- Existe muy alta correlación entre radio y torio
- Existe muy alta correlación entre cesio, potasio, ρ y OC

El análisis factorial confirma estos resultados proporcionando dos factores:

El factor 1, que depende principalmente de las variables Cs, K, OC y ρ , y el factor 2, controlado por las actividades de los radionúclidos radio y torio. El primero estimamos que define la *granulometría* del sedimento, y el segundo su *mineralogía*.

En base a estos resultados, investigamos las funciones que relacionan las variables estudiadas, encontrando que funciones como las que se indican a continuación satisfacen los valores experimentales con buenos coeficientes de correlación, y errores relativos inferiores, en algunos casos, al 5%:

$$\rho = a + bF$$

$$A_{Ra} = a + b A_{Th}$$

$$A_{Cs} = a + b OC + c \rho$$

$$A_K = a + b OC + c A_{Th}$$

siendo F es el porcentaje de fango del sedimento.

Estos resultados nos llevan a una importante conclusión: **es posible determinar las actividades de los radionúclidos gamma presentes en los sedimentos mediante la medida de sencillas variables no radiométricas**, lo que posee claras ventajas económicas y de ahorro de tiempo en relación a la medida de las mismas mediante espectrometría gamma, y permite realizar un control radiológico a través de tales variables.

Análogamente podemos plantear el problema inverso, esto es, indagar acerca del tipo de información no radiométrica que se puede obtener a partir de los datos de actividades en los sedimentos. Para ello se determinó el valor medio de la actividad específica de cada radionúclido en tres grupos granulométricos, **arena, limo y arcilla**, cuyos valores constituyen la denominada **huella radiométrica** del sedimento

El análisis discriminante permite encontrar la función F, dada por

$$F = -0.048 A_{Ra} + 0.24 A_{Th} + 0.66 A_{Cs} - 0.02 A_K - 3.64$$

cuyo valor se encuentra comprendido en el intervalo [-3.3, -1.7] para sedimentos arenosos, y en el intervalo [0.35, 3.6] para sedimentos fangosos.

Por otra parte, demostrada la dependencia de la concentración de limo o arcilla con las actividades del ^{40}K y ^{137}Cs , se aplica de nuevo análisis discriminante para encontrar una función capaz de determinar la naturaleza arcillosa o limosa del sedimento fangoso, encontrando la función discriminante

$$G = -3.46 + 0.005 A_K + 0.318 A_{Cs}$$

que clasifica los sedimentos fangosos en limo ($G < 0$) y arcilla ($G > 0$). La representación espacial de la granulometría en la bahía de Cádiz usando estas funciones discriminantes (figuras 5 y 6) reproduce con notable grado de aproximación los mapas granulométricos obtenidos sobre la zona por los procedimientos tradicionales, lo que ratifica la validez de la investigación desarrollada.

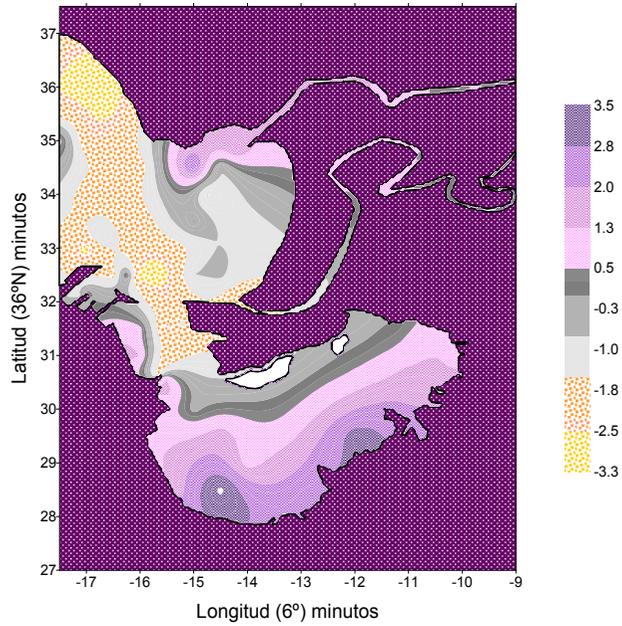


Figura 5.- Función discriminante F

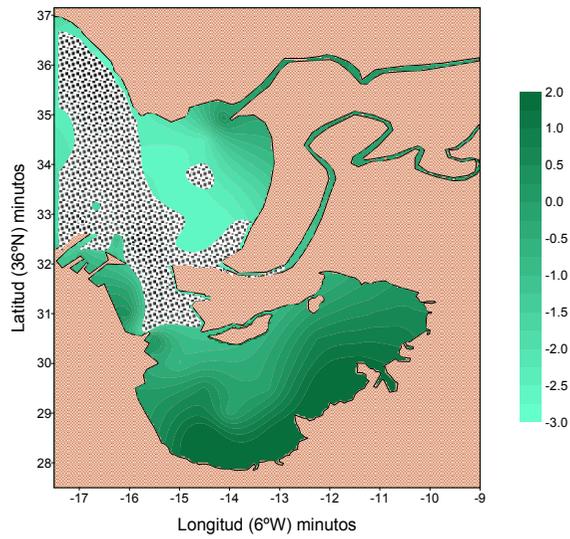


Figura 6.- Función discriminante G

Bibliografía recomendada

Alonso, J.C. y Díaz del Río V. (1994) Caracterización de los sedimentos superficiales en función de su contenido en materia orgánica: relación

- granulometría-materia orgánica. Cuadernos de Química Oceanográfica 1, 55-82.
- Cundy, A.B. y Croudace, I.W. (1995) Physical and Chemical Associations of Radionuclides and Trace Metals in Estuarine sediments: an example from Poole Harbour, Southern England *Journal of Environmental Radioactivity* 29, 191-211.
- Cho, Y-H, Jeong, C-H. y Hahn, P-S. (1996) Sorption Characteristics of ^{137}Cs onto clay minerals: effect of mineral structure and ionic strength. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 204, 33-43.
- De Meijer, R.J. Tanczos, I. C. y Stapel C. (1996) Radiometry as a Technique for Use in Coastal Research. *Geology of Siliciclastic Shelf Seas*. Geological Society, Special Publication, 117, 289-297.
- Fauré, M.H., Sardin, M. y Vitorge, P. (1996) Transport of Clay Particles and Radioelements in a salinity gradient: experiments and simulations. *Journal of Contaminant Hydrology*, 21 (1996) 255-267.
- He Q. y Walling D.E. (1996) Interpreting Particle Size Effects in the Adsorption of ^{137}Cs and Unsupported ^{210}Pb by Mineral Soils and Sediments. *Journal of Environmental Radioactivity*, 30, 117-137.
- Ramos-Lerate, I, Barrera, M, Ligeró, R.A y Casas-Ruiz, M. (1998) Radionuclides in the environment of the Bay of Cadiz. *Radiation Protection Dosimetry*, 75, 41-48.
- Ramos-Lerate, I, Barrera, M, Ligeró, R.A, y Casas-Ruiz, M. (1998) Use of gamma radionuclides as tracers to investigate the transport of sediments in the Bay of Cádiz. *Applied Sciences and the Environment*. Wit Press/Computational Mechanics Publication, Southampton, 217-229.

Referencia de este artículo:

- Ligeró L. A. (2004): Radiactividad Ambiental: Utilización de Trazadores en Sedimentos Costeros. En: L. Barbero y M.P. Mata (Eds.). *Geoquímica Isotópica Aplicada al Medioambiente*, Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía (ISSN: 1698-5478), 1, 97-106.